

Εκτίμηση συντελεστή ασφαλείας για την ταπείνωση της στέψης χωμάτινων φραγμάτων

Σ.Ι. Πυθαρούλη

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών και Περιβαλλοντολόγων
Μηχανικών, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΣΤΡΑΘΚΛΑΪΝΤ.

Σ.Κ. Στείρος

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Λέξεις κλειδιά: χωμάτινο φράγμα, καθίζηση στέψης, όριο ασφαλείας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η ταπείνωση της στέψης των χωμάτινων φραγμάτων με κεντρικό πυρήνα περιγράφεται συνήθως ως εκθετική συνάρτηση του χρόνου και αποτελεί σημαντικό παράγοντα ασφαλείας και λειτουργικότητας, δεδομένου ότι ακραίες τιμές που έχουν παρατηρηθεί σε διάφορα φράγματα έχουν οδηγήσει σε δραματική μείωση του δυναμικού τους και μεγάλης κλίμακας και κόστους επισκευές (πχ φράγμα Ατατούρκ, Τουρκία).

Μελετήσαμε την ταπείνωση της στέψης >40 χωμάτινων φραγμάτων, ηλικίας 10-41 ετών, που βρίσκονται σε διάφορα μέρη του κόσμου. Η ανάλυσή μας έδειξε ότι το όριο ασφαλείας ταπείνωσης της στάθμης πρέπει να αυξάνεται με την ηλικία του φράγματος και ότι οι περισσότερες εκτιμήσεις του ορίου ασφαλείας είναι πολύ συντηρητικές. Ένα όριο ασφαλείας της τάξης του 1% (λόγος βύθισης προς ύψος φράγματος) φαίνεται ρεαλιστικό για όλη τη λειτουργική ζωή του φράγματος. Το φράγμα των Κρεμαστών που είναι από τα πλέον κρίσιμα στην Ελλάδα, εμφανίζει τιμή αρκετά χαμηλότερη από το όριο αυτό.

1 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΧΩΜΑΤΙΝΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν συγκεκριμένες θεωρίες και προδιαγραφές σχετικά με το θέμα των παραμορφώσεων στα χωμάτινα φράγματα και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν παρά το γεγονός ότι πρόκειται για ένα αντικείμενο με σημαντικές προεκτάσεις. Ως αποτέλεσμα τα αποδεκτά όρια που χρησιμοποιούνται σήμερα για το μέγεθος των μετακινήσεων να βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις. Στην παρούσα εργασία, εντοπίσαμε στη διεθνή βιβλιογραφία μεμονωμένες μελέτες μακροχρόνιας συμπεριφοράς > 40 φραγμάτων τις οποίες εξετάσαμε. Οι μελέτες αυτές δεν βασίζονται στην ανάλυση του ιδίου τύπου δεδομένων, π.χ. γεωδαιτικά, γεωτεχνικά κτλ. αλλά τα συμπεράσματα είναι σημαντικά και μπορούν να αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης με φράγματα του ίδιου τύπου.

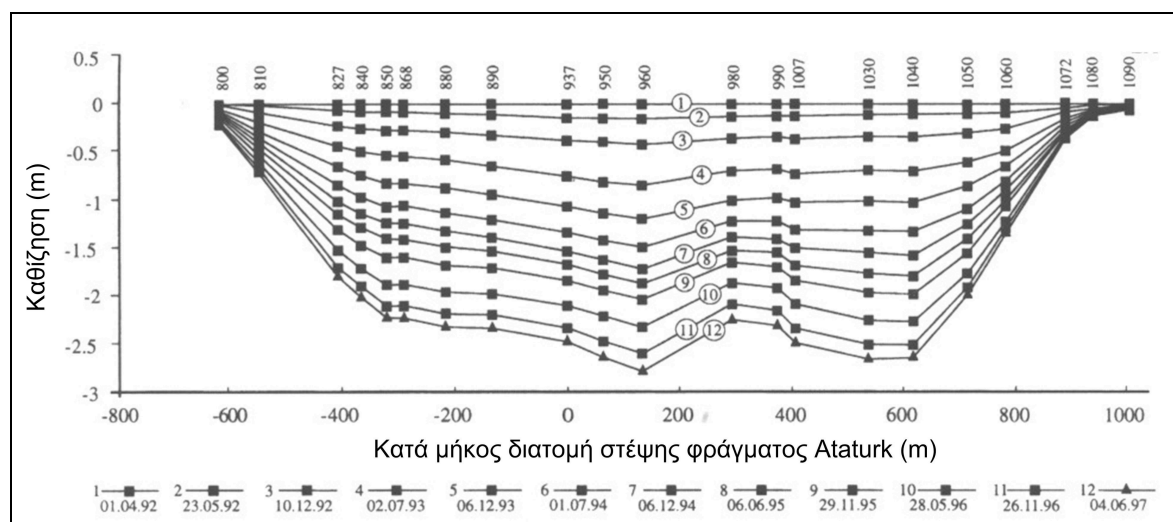
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι περιπτώσεις τριών φραγμάτων: (1) φράγμα Ατατούρκ, (2) φράγμα Beliche και (3) φράγμα Κρεμαστών. Τα δύο πρώτα φράγματα αποτελούν προβληματικές περιπτώσεις και παρουσίασαν ακραίες καθιζήσεις. Το φράγμα Κρεμαστών είναι το ψηλότερο χωμάτινο φράγμα στην Ελλάδα ηλικίας > 40 ετών και επομένως υψίστης σημασίας από άποψη ασφαλείας.

1.1 Φράγμα Ατατούρκ, Τουρκία

Το φράγμα Atatürk είναι το τέταρτο μεγαλύτερο λιθόρριπτο φράγμα στον κόσμο με μέγιστο ύψος 169 μέτρα και μήκος στέψης 1664 μέτρα [6]. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1990 σε πολύ

συντομότερο διάστημα από εκείνο που είχε υπολογιστεί αρχικά (περίπου 3.5 χρόνια αντί των 5.5; [2]).

Σύμφωνα με τους [2] καθώς η στάθμη του ταμιευτήρα άρχισε να αυξάνει, εμφανίστηκαν προβλήματα καθίζησης κατά μήκος της στέψης. Οι καθιζήσεις έφτασαν ακόμη και τα 7m μέγεθος που αντιστοιχεί σε ποσοστό 3.8% του ύψους του φράγματος (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Χρονική μεταβολή των καθιζήσεων κατά μήκος της στέψης του φράγματος Ataturk. Παρατηρήθηκε καθίζηση > 2.5m σε διάστημα 5 ετών [13].

Δοκιμές συμπίκνωσης αποκάλυψαν ότι η συμπίκνωση του αργιλικού πυρήνα κατά την κατασκευή δεν είχε πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τα όσα είχαν καθοριστεί βάσει των δοκιμών Proctor που είχαν γίνει στο εργαστήριο. Οι καθιζήσεις του κατάντη πρανούς αποδόθηκαν στο ίδιο βάρος του φράγματος και στο νερό της βροχής που απορροφά [2].

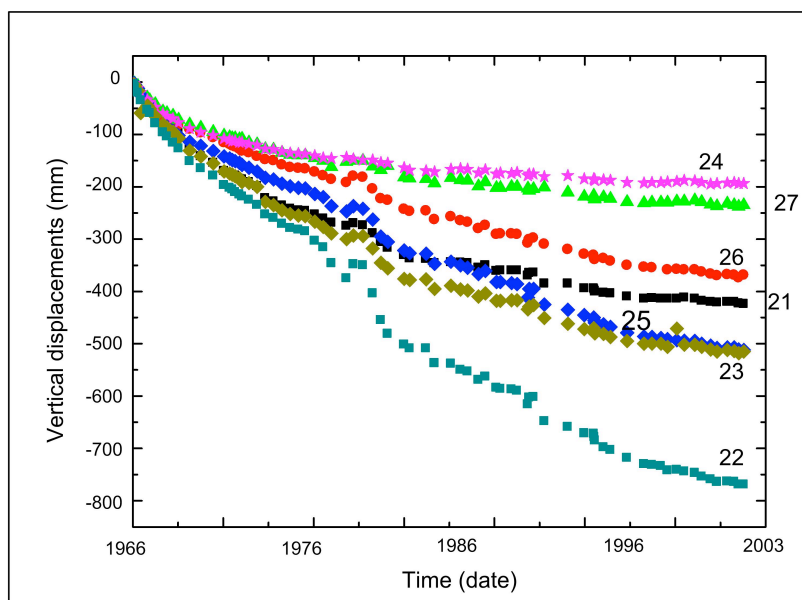
1.2 Φράγμα Beliche, Πορτογαλία

Το φράγμα Beliche έχει ύψος 54 μέτρα και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1986. Το φράγμα παρουσίασε εκτεταμένες καθιζήσεις κατά την πλήρωση του ταμιευτήρα. Πιο συγκεκριμένα, όταν το φράγμα είχε φτάσει σε ύψος 47m και πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής του, η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα έφτασε τα 29m εξαιτίας έντονων βροχοπτώσεων. Κατακόρυφες μετακινήσεις > 0.80m σημειώθηκαν στο μέσο περίπου του ύψους του ανάντη πρανούς. Παρόμοιες ήταν οι μετακινήσεις και στο κατάντη πρανές. Η μελέτη των μετακινήσεων του φράγματος σε συνδυασμό με διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης κατέληξε ότι το φράγμα επηρεάζεται από τη βροχή (κυρίως το κατάντη πρανές). Αποδείχτηκε επίσης ότι οι μετακινήσεις του φράγματος αμέσως μετά την κατασκευή έχουν άμεση σχέση με τη βροχόπτωση η οποία μπορεί να επηρεάζει την αλλαγή στη γεωμετρία του φράγματος και για πολλά χρόνια αργότερα [1].

1.3 Φράγμα Κρεμαστών, Ελλάδα

Το φράγμα των Κρεμαστών είναι ένα από τα υψηλότερα χωμάτινα φράγματα στην Ευρώπη με ύψος 160m και μήκος στέψης 456m. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 1966. Ένα μήνα μετά το κλείσιμο της σήραγγας εκτροπής παρατηρήθηκαν στα κατάντη περιοχές με υγρασία σε μικρή απόσταση από τον πόδα του φράγματος και τα δύο αντερείσματα. Καθώς η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα συνέχιζε να αυξάνει, διαρροές, ο όγκος των οποίων αυξήθηκε σταδιακά, εμφανίστηκαν πάνω στις επιφάνειες των αντερείσμάτων. Για την αντιμετώπισή τους οργανώθηκε μια σειρά εργασιών επιπρόσθετων τσιμεντενέσεων και στοών με στόχο την αποστράγγιση του νερού.

Εκτός από τις διαρροές το φράγμα εμφανίζει καθιζήσεις σε σημεία της στέγης, ωστόσο το μέγεθός τους μέχρι σήμερα είναι εντός των ορίων που έχουν οριστεί στη μελέτη. Η μέγιστη καθίζηση της στέγης που είχε καταγραφεί μέχρι το 2002 ήταν 77cm (Εικόνα 2) δηλαδή περίπου το μισό της αναμενόμενης [9]. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο 0.48% του ύψους του φράγματος. Το μέγεθος αυτό της καθίζησης ήταν μικρότερο από την καθίζηση που είχε υποστεί στην πραγματικότητα η στέγη, καθώς η παραμόρφωση του φράγματος για περίπου ένα χρόνο μετά το κλείσιμο της σήραγγας εκτροπής δεν έχει καταγραφεί ή τουλάχιστον δεν ήταν διαθέσιμη.



Εικόνα 2: Χρονική εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων των σημείων ελέγχου (σημεία 22 – 27) της στέγης του φράγματος Κρεμαστών. Μέγιστη καθίζηση εμφανίζει το σημείο 22 (764mm) στο μέσο της στέγης του φράγματος. Οι αρνητικές τιμές της για την κατακόρυφη μετακίνηση υποδηλώνουν καθίζηση του σημείου (από [10]).

Η ποσότητα των διαρροών στο φράγμα Κρεμαστών αυξάνεται με την αύξηση της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα και ενώ δεν επηρεάζει άμεσα την κατασκευή, έχει ως αποτέλεσμα η στάθμη του νερού να μην έχει φτάσει την τιμή σχεδιασμού μέχρι και σήμερα.

2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

Ορισμένοι ερευνητές μελέτησαν ένα μεγάλο αριθμό από φράγματα, ομαδοποίησαν τα αποτελέσματα και επιχείρησαν τη διεξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Τέτοιες είναι οι μελέτες των [3], [4], [12] κ.ά. Ωστόσο, ακριβώς επειδή τα φράγματα αποτελούν κατασκευές με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που επηρεάζονται από μεγάλο αριθμό παραμέτρων ακόμη και συμπεράσματα που βασίστηκαν στη μελέτη μεγάλου αριθμού φραγμάτων πολλές φορές δεν επαληθεύονται στο σύνολό τους [8].

Ο [4] ανέλυσε τις μετακινήσεις 15 λιθόρριπτων φραγμάτων και τα κυριότερα συμπεράσματά του για επιτυχή φράγματα συνοψίζονται στα εξής:

- Η καθίζηση ενός λιθόρριπτου φράγματος πρακτικά θεωρείται αμελητέα όταν ο ετήσιος ρυθμός μεταβολής της φτάσει να είναι $< 0.02\%$ του ύψους του φράγματος. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε διάστημα 24 - 30 μηνών μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος.
- Η καθίζηση της στέγης παραμένει $< 0.35\%$ του ύψους του φράγματος.
- Η καθίζηση στο κατάντη πρηνές μπορεί να φτάσει το $0.70 - 0.80\%$ του ύψους του φράγματος.

- Η μέγιστη καθίζηση ως ποσοστό του ύψους του φράγματος δεν εντοπίζεται πάντα στη θέση με τη μέγιστη καταγεγραμμένη καθίζηση ή στη μέγιστη διατομή του φράγματος.
- Η οριζόντια απόκλιση της στέψης προς τα κατάντη είναι ίση ή μεγαλύτερη της καθίζησης.

Ωστόσο, άλλοι μελετητές διαφωνούν με κάποια από τα συμπεράσματα του Dascal καθώς οι περιπτώσεις φραγμάτων που ανέλυσαν κατέληξαν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος που απαιτείται ώστε η παραμόρφωση να παραμένει σε τιμές $< 0.02\%$ του ύψους μπορεί να είναι από 24 – 30 μήνες έως και 25 χρόνια μετά το πέρας της κατασκευής του φράγματος. Επιπλέον, η προς τα κατάντη οριζόντια απόκλιση της στέψης σε ορισμένες περιπτώσεις βρέθηκε μικρότερη της καθίζησης [8].

3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ – ΥΨΟΥΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

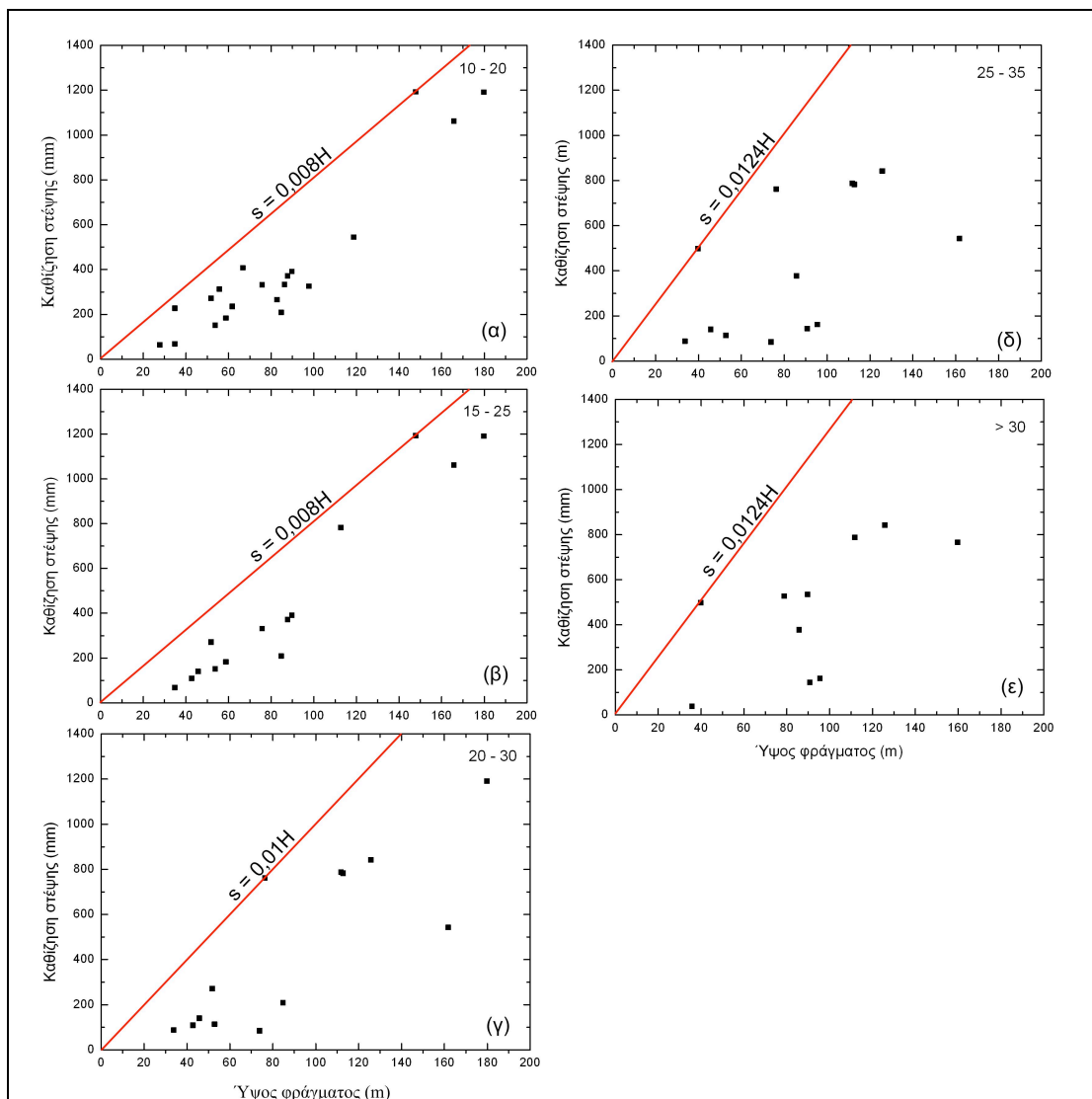
Αρκετοί ερευνητές έχουν επιχειρήσει να εκτιμήσουν κάποια όρια σχετικά με την αναμενόμενη/επιτρεπόμενη καθίζηση ενός φράγματος που παρατηρείται μετά το πέρας της κατασκευής του ως ποσοστό του ύψους του. Οι [11] πρότειναν ένα ποσοστό καθίζησης ίσο με το $0.25 - 1\%$ του ύψους του φράγματος. Το αντίστοιχο ποσοστό για τον [4] ήταν 0.35% ενώ για τους [5] οι καθιζήσεις θα πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 0.1 και 0.4% .

Στην παρούσα μελέτη συγκεντρώσαμε στοιχεία σχετικά με την μέγιστη καθίζηση στέψης που παρατηρήθηκε τουλάχιστο 10 χρόνια μετά το πέρας της κατασκευής στη διατομή με το μέγιστο ύψος. Τα στοιχεία αφορούσαν τις μέγιστες καθιζήσεις στέψης εντός των φυσιολογικών ορίων για > 40 χωμάτινα φράγματα με κεντρικό πυρήνα σε όλο τον κόσμο [7]. Ωστόσο, για τις τιμές αυτές δεν μεσολαβούσε το ίδιο χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή. Οι καθιζήσεις αναφέρονταν σε χρονικές περιόδους με εύρος 10 – 41 χρόνια. Για το λόγο αυτό οι διαθέσιμες τιμές ταξινομήθηκαν σε πέντε επικαλυπτόμενες χρονικά κατηγορίες ανάλογα με το χρονικό διάστημα που είχε περάσει από το πέρας της κατασκευής και στο οποίο αναφερόταν η διαθέσιμη τιμή μέγιστης καθίζησης:

Κατηγορία I	:	10 – 20 χρόνια
Κατηγορία II	:	15 – 25 χρόνια
Κατηγορία III	:	20 – 30 χρόνια
Κατηγορία IV	:	25 – 35 χρόνια
Κατηγορία V	:	> 30 χρόνια

Η κάθε κατηγορία αποτελούνταν από 10 – 12 τιμές περίπου ώστε τα συμπεράσματα να είναι στατιστικά συγκρίσιμα.

Τα συμπεράσματα της ανάλυσης αυτής συνοψίζονται σε μορφή διαγράμματος (Εικόνα 3). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο ύψος του φράγματος στη μέγιστη διατομή και ο κατακόρυφος στη μέγιστη παρατηρηθείσα καθίζηση της στέψης. Από την Εικόνα 3(α)-(β) συνάγεται ότι μέχρι και 25 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής ενός φράγματος, οι καθιζήσεις στη στέψη παρουσιάζουν μια σαφή γραμμική συσχέτιση με το ύψος του φράγματος στη μέγιστη διατομή. Πέρα από το χρονικό αυτό όριο, δηλαδή για χρονικές περιόδους > 25 ετών δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιος είδους συσχέτιση αλλά είναι δυνατό να προσδιοριστεί ένα ανώτατο όριο μιας περιοχής εντός της οποίας περιέχεται η αναμενόμενη καθίζηση για συγκεκριμένο ύψος φράγματος (Εικόνα 3γ-ε).



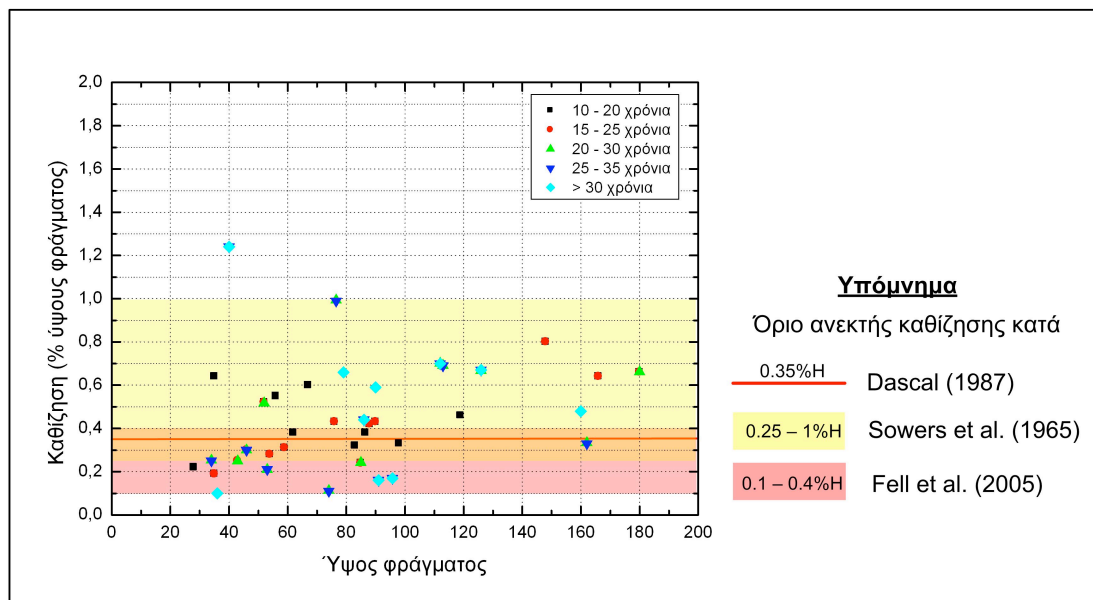
Εικόνα 3: Μέγιστη παρατηρηθείσα καθίζηση της στέψης ως προς το ύψος του φράγματος στη μέγιστη διατομή για (α) 10 – 20 χρόνια, (β) 15 – 25 χρόνια, (γ) 20 – 30 χρόνια, (δ) 25 – 35 χρόνια και (ε) > 30 χρόνια μετά το πέρας της κατασκευής. Διαπιστώθηκε ότι μέχρι και τα 25 χρόνια μετά την κατασκευή η καθίζηση μεταβάλλεται γραμμικά με το ύψος του φράγματος (α) – (β). Δεν συμβαίνει το ίδιο αν έχουν περάσει > 25 χρόνια. Η κόκκινη ευθεία εκφράζει την περιβάλλουσα της αναμενόμενης καθίζησης για κάθε περίπτωση [13].

Οι ευθείες γραμμές στις Εικόνες 3(α) – (ε) μπορεί να θεωρηθούν ως μια περιβάλλουσα της αναμενόμενης καθίζησης για κάθε περίπτωση καθώς προέκυψαν ενώνοντας την αρχή των αξόνων (σημείο μηδέν) με ένα από τα σημεία κάθε διαγράμματος, τέτοιο ώστε όλα τα υπόλοιπα σημεία του ίδιου διαγράμματος να βρίσκονται δεξιότερα της ευθείας. Η χάραξη των ευθειών ξεκινάει από την αρχή των αξόνων καθώς η αναμενόμενη καθίζηση για μηδενικό ή πολύ μικρό ύψος φράγματος είναι μηδέν. Η κλίση της ευθείας εκφράζει το ποσοστό του ύψους του φράγματος στο οποίο αντιστοιχεί η καθίζηση.

4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Διαπιστώθηκε ότι για τα φράγματα που εξετάστηκαν η μέγιστη αναμενόμενη καθίζηση αντιστοιχεί σε ποσοστό 0.8% του ύψους του φράγματος για χρονική περίοδο μέχρι και 25 χρόνια μετά το πέρας της κατασκευής, 1% για διάστημα έως και 30 χρόνια και μπορεί να πάρει τιμές > 1% για περιόδους > 30 χρόνων.

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει τις καθιζήσεις της στέψης (ως ποσοστό του ύψους του φράγματος) για κάθε ένα από τα φράγματα που εξετάστηκαν καθώς επίσης τα όρια για την αναμενόμενη καθίζηση στέψης που δίνονται στη βιβλιογραφία από τους [4], [11] και [5] και που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Διαπιστώθηκε ότι σε σύνολο > 40 φραγμάτων παρουσιάστηκε μία μόνο περίπτωση όπου εμφανίστηκε καθίζηση στέψης > 1% του ύψους του φράγματος. Η περίπτωση αυτή αφορά το φράγμα Bellfield (Αυστραλία). Το μεγάλο ποσοστό καθιζήσεων που παρατηρήθηκε στο φράγμα αυτό οφείλεται πιθανότατα στην ελλιπή συμπίκνωση του υλικού κατά την κατασκευή [7]. Τα όρια 0.35%H και 0.1 – 0.4%H, όπου H το ύψος του φράγματος, που δίνονται από τους [4] και [5] αντίστοιχα φαίνεται να είναι συντηρητικά καθώς > 50% των φραγμάτων που εξετάστηκαν παρουσίασαν καθίζηση στέψης > 0.4%H.



Εικόνα 4: Καθιζήσεις φραγμάτων ως ποσοστό του ύψους τους. Οι καθιζήσεις παρουσιάζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το χρονικό διάστημα που πέρασε από την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος μέχρι την καταγραφή τους. Οι περιοχές που επισημαίνονται με χρώματα αφορούν τα όρια ανεκτής καθίζησης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Διαπιστώνεται ότι σε σύνολο > 40 φραγμάτων παρουσιάστηκε μία μόνο περίπτωση όπου εμφανίστηκε καθίζηση στέψης > 1% του ύψους του φράγματος: φράγμα Bellfield, πιθανότατα λόγω ελλιπούς συμπίκνωσης [7] ([13]).

Επομένως, για την συνολική καθίζηση της στέψης χωμάτινων φραγμάτων με κεντρικό πυρήνα προτείνεται ως κρίσιμη τιμή ποσοστό 0.8 - 1% του ύψους του φράγματος στη μέγιστη διατομή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 η καθίζηση ως ποσοστό του ύψους του φράγματος για όλα σχεδόν τα φράγματα παίρνει τιμές < 0.8%. Παρόλα αυτά η ανώτερη κρίσιμη τιμή προσδιορίστηκε ίση με 1% και αυτό γιατί συνήθως όπως στην περίπτωση του φράγματος Κρεμαστών, η πραγματική καθίζηση της στέψης είναι μεγαλύτερη καθώς το πρώτο χρονικό διάστημα αμέσως μετά το κλείσιμο της σήραγγας εκτροπής δεν συμπεριλαμβάνεται στις μετρήσεις. Η τιμή 1% θεωρείται ότι περιλαμβάνει και αυτές τις τιμές που δεν έχουν καταγραφεί.

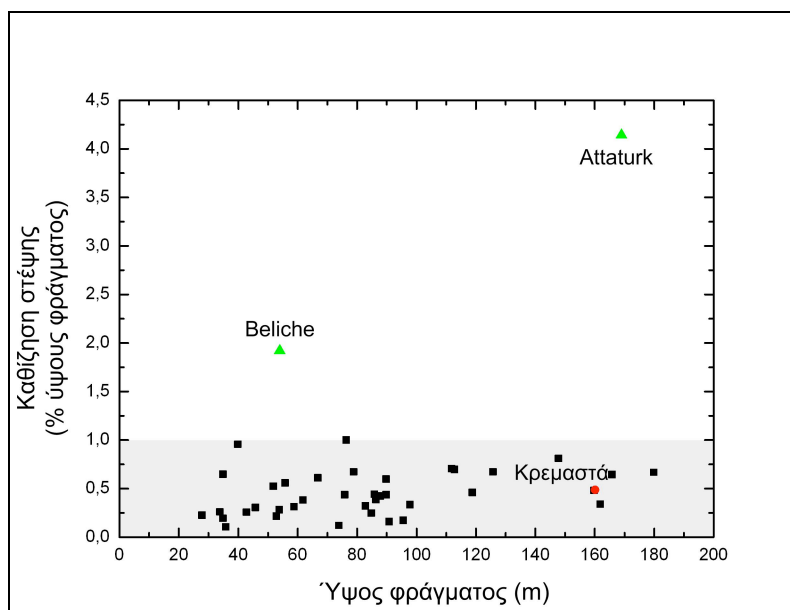
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Εικόνα 5 παρουσιάζει την καθίζηση της στέψης του φράγματος των Κρεμαστών (κόκκινο σημείο) ως ποσοστό του ύψους του στη μέγιστη διατομή. Η καθίζηση ίση με 0.48% είναι μικρότερη της κρίσιμης τιμής 0.8 - 1% που προσδιορίστηκε προηγουμένως αλλά μεγαλύτερη των τιμών 0.35% και 0.2 – 0.4% που έχουν προταθεί από τον [4] και τους [5] αντίστοιχα.

Στο ίδιο σχήμα για συγκριτικούς λόγους παρουσιάζονται τα ποσοστά καθίζησης για τα δύο φράγματα - προβληματικές περιπτώσεις, το φράγμα Ataturk (Τουρκία) και το φράγμα Beliche (Πορτογαλία). Οι καθιζήσεις των συγκεκριμένων φραγμάτων ξεπερνούν κατά πολύ την κρίσιμη τιμή του 1%.

Χωμάτινα φράγματα που παρουσιάζουν καθιζήσεις > 1% όπως η περίπτωση του φράγματος Bellfield δεν σημαίνει πάντα ότι βρίσκονται ένα βήμα πριν την αστοχία αλλά σίγουρα αποτελούν ένδειξη απόκλισης από την αναμενόμενη συμπεριφορά και πιθανής κακοτεχνίας (κυρίως όσον αφορά τη συμπύκνωση του υλικού) κατά την κατασκευή. Τέτοιες περιπτώσεις χρήζουν προσοχής και περαιτέρω διερεύνησης.

Η μέγιστη καθίζηση μεταξύ των > 40 φραγμάτων που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε για το φράγμα El Infiernillo (Μεξικό) σε διάστημα 17 χρόνων από την έναρξη λειτουργίας του [7] γεγονός που σημαίνει ότι οι μεγαλύτερες καθιζήσεις δεν εμφανίζονται αποκλειστικά και μόνο σε φράγματα με το μεγαλύτερο ύψος αλλά και σε χαμηλότερα.



Εικόνα 5: Καθίζηση στέψης ως ποσοστό του ύψους του φράγματος. Διακρίνονται οι καθιζήσεις του φράγματος των Κρεμαστών και των φραγμάτων Beliche και Attaturk. Η γκριζα περιοχή αντιπροσωπεύει καθιζήσεις εντός του προτεινόμενου ορίου (<1%). Οι καθιζήσεις των Κρεμαστών είναι αναμενόμενες, όχι όμως και των άλλων δύο φραγμάτων [13].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Alonso E.E, Olivella S. and Pinyol N.M. 2005. A review of Beliche Dam. *Geotechnique*, Volume 55, Issue 4:267-285
2. Cetin H., Laman M. and Ertunc A. 2000. Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey, *Engineering Geology*, Volume 56: 225-242
3. Clements R. 1984. Postconstruction deformation of rockfill dams. *Journal of geotechnical Engineering*, Volume 110, Issue 7: 821 – 840

4. Dascal O. 1987. Post-construction deformation of rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 113, Issue 1:46-59
5. Fell R., McGregor P., Stapledon D. and Graeme B. 2005. *Geotechnical Engineering of Dams*, Taylor & Francis, London
6. Goltz T. 1990. Program with 22 dams suffering, *Engineering News-Record (ENR)*: 40-41
7. Hunter G.J. 2003. The pre- and post-failure deformation behaviour of soil slopes. University of New South Wales, *PhD thesis*
8. McCleskey T. and Nonveiller E. 1988. Discussion on “Postconstruction deformation of Rockfill dams” by Dascal. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 114, Issue 12: 1453 – 1456
9. Pytharouli S.I. and Stiros S.C. 2008. Dam crest settlement, reservoir level fluctuations and rainfall: Evidence for a causative relationship for the Kremasta dam, Grece. In Proceedings of 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, 12-15 May, Lisbon, Portugal.
10. Pytharouli S.I. and Stiros S.C. 2009. Investigation of the parameters controlling crest settlement of a major earthfill dam based on the threshold correlation analysis, *Journal of Applied Geodesy*, Volume 3, Issue 1:55-62
11. Sowers G.F., Williams R.C. and Wallace T.S. 1965. Compressibility of Brocken rock and the settlement of rockfills. In *Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Toronto, Canada, Volume 2: 561 – 565
12. Tedd P., Charles J.A., Holton I.R. and Robertshaw A.C. 1997. The effect of reservoir drawdown and long-term consolidation on the deformation of old embankment dams. *Geotechnique*, Volume 47, Issue 1: 33-48
13. Πυθαρούλη, Σ.Ι. 2007. Μελέτη της μακροχρόνιας παραμόρφωσης του φράγματος των Κρεμαστών με βάση ανάλυση γεωδαιτικών δεδομένων και μεταβολών στάθμης ταμιευτήρα, Διδακτορική Διατριβή: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Estimation of a safety threshold for the crest settlements of embankment dams

S.I. Pytharouli

Lecturer, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde.

S.C. Stiros

Professor, Department of Civil Engineering, University of Patras.

Key Words: embankment dam, crest settlement, safety threshold

SUMMARY: The crest settlements of embankment dams with a central clay core are usually described as an exponential function of time. They play a major role in the safety and operational capacity of the dam, especially when taking into account that extreme crest settlements that have been observed for some of these dams have resulted in a significant reduction of the storage capacity of the reservoir and maintenance works at large scales and cost (e.g. Ataturk dam, Turkey).

We studied the crest settlements of > 40 embankment dams, 10-41 years old, located at different parts of the world. Our analysis shows that the safety threshold for the crest settlements should not be a constant but increase with the age of the dam and that most of suggested thresholds in the literature are too conservative. A safety threshold of 1% (crest settlement to dam height ratio) appears to be realistic for the whole operational life of the dam. The Kremasta dam, whose age and size places it to a most critical situation, has a crest settlement to dam height ratio value well below the above threshold.